

环境及营养条件对稀脉浮萍和紫背浮萍氮磷含量的影响

种云霄^{1,2}, 胡洪营¹, 钱易¹

(1. 清华大学环境科学与工程系环境模拟与污染控制国家重点实验室, 北京 100084; 2. 华南农业大学资源环境学院, 广州 510642)

摘要:以稀脉浮萍和紫背浮萍为对象, 对在不同光照、温度和培养液氮磷浓度等条件下生长的生物量氮和磷含量的系统分析, 研究了环境营养条件对氮和磷含量的影响。结果表明紫背浮萍和稀脉浮萍氮含量主要受培养液中氮浓度和温度的影响, 低氮浓度和低温均可导致氮含量降低, 氮浓度超过 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 温度高于 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 时氮含量基本保持稳定; 光照强度变化对这 2 种浮萍的氮含量基本没有影响。紫背浮萍和稀脉浮萍磷含量会受培养液中磷浓度、温度和光照的影响。低温和低光照可导致磷含量降低, 温度超过 $25 \text{ }^\circ\text{C}$, 光照高于 8000 lx 时 2 种浮萍磷含量则基本保持稳定; 这 2 种浮萍的磷含量均随培养液中磷浓度增加而增加直至达到饱和, 它们之间的关系可以用 Monod 方程来描述, 其中紫背浮萍饱和磷含量高于稀脉浮萍。

关键词:浮萍; 氮磷; 氮磷转化; 污水

中图分类号: X710.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2005)05-0067-05

Effect of Environment and Nutrient Factors on the Content of Nitrogen and Phosphorus in Two Duckweeds Species: *Spirodela polyrrhiza* and *Lemna aequinoctialis*

CHONG Yur-xiao^{1,2}, HU Hong-ying¹, QIAN Yi¹

(1. Environmental Simulation and Pollution Control State Key Joint Laboratory, Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 10084, China; 2. Department of Environmental Science and Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Effects of temperature, light density, nitrogen level and phosphorus level of medium to the content of two species *Spirodela polyrrhiza* and *Lemna aequinoctialis* were researched. The results showed that the content of nitrogen in two species kept constant when the concentration of nitrogen was higher than $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and temperature higher than $25 \text{ }^\circ\text{C}$. It decreased under lower concentrations of nitrogen and lower temperature. Photon flux density had no effect on it. But weak photon flux density and low temperature led to reduce the content of phosphorus of duckweed. The content of phosphorus in two duckweed species kept constant when photon flux density was higher than 8000 lx and temperature higher than $25 \text{ }^\circ\text{C}$. The relationship between the content of phosphorus and concentrations of phosphorus in medium could be described by Monod model. The saturated phosphorus content of *Spirodela polyrrhiza* was higher than *Lemna aequinoctialis*.

Key words: duckweed; nitrogen and phosphorus; nutrient discovery; waste water

大量氮磷等营养物质的排入, 可导致水体发生严重的富营养化。而大型水生植物的生长可以吸收转化水中的氮磷等营养物质。近年来, 为了能够高效低耗地控制水体的富营养化, 研究开发以大型水生植物为主的生态工程技术脱除与转化水中的氮磷正在成为水处理领域的热点^[1-4]。浮萍科植物是一个漂浮生长在水流相对平缓的湖泊、河湾水面上的高等水生植物类群, 它们的叶状体和根都可从水中直接吸收氮磷等营养物质^[5]。已有研究表明浮萍科植物具有较高的氮磷含量和较快的生长速度, 并且其个体较小, 易管理和打捞^[6,7], 因此, 在转化氮磷的生态工程中, 它们已成为具有重要应用潜力的类

群^[8-10]。

浮萍种类的氮磷含量是对水中氮磷转化能力的重要指标, 而植物体的氮磷含量往往易受环境及营养条件的影响^[11]。对浮萍科植物的研究也表明在不同的环境条件下, 其氮磷含量亦有明显不同^[5]。本文以在我国常见的稀脉浮萍和紫背浮萍为研究对象, 系统的分析了主要的环境及营养条件对氮磷含量的影响, 以期在生态工程中的实际应用提供科学的依据。

收稿日期: 2004-12-16; 修订日期: 2005-03-20

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (G1999945711)

作者简介: 种云霄 (1974-), 女, 博士, 主要研究方向为水污染治理生态技术。

1 材料与方 法

1.1 萍种及培养条件

(1) 稀脉浮萍 (*Lemma aequinoctialis*) 和紫背浮萍 (*Spirodela polyrrhiza*) 采自云南滇池附近湿地,带回实验室后用经过曝气生物滤池处理的生活污水($pH:7\sim 8$, $COD:10\sim 50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $NH_3\text{-N}:5\sim 10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $NO_3\text{-N}:20\sim 30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $TP:3\sim 5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)驯化培养,生物量大量扩增后用作试验材料.驯化培养条件:温度 $26\text{ }^\circ\text{C}\sim 30\text{ }^\circ\text{C}$,光照 $2\ 000\sim 3\ 000\text{ lx}$,光暗时间比为 $16\text{ h}/8\text{ h}$.

(2) 培养液 以人工培养液(组成见表 1)为基础,其中 pH 、氮、磷水平按具体实验设计进行调整.

表 1 人工培养液组成^[12]

Table 1 The composition of artificial culture

化学试剂	浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
NH_4NO_3	20
$CaCO_3$ ¹⁾	15
$MgSO_4\cdot 7H_2O$	50
K_2HPO_4	40
$FeSO_4\cdot 7H_2O$	50
$Na_2\text{-EDTA}$	1
H_3BO_3	1.42
$MnSO_4\cdot 7H_2O$	1.54
$ZnSO_4\cdot 7H_2O$	6.59
$Na_2MoO_4\cdot 2H_2O$	2.52
$CuSO_4\cdot 5H_2O$	0.39
$CoSO_4\cdot 7H_2O$	0.09

1) $CaCO_3$ 用浓盐酸溶解,培养液 pH 用 KOH 调节

(3) 培养装置 光照培养箱,哈尔滨东联生产,容积:280 L,光照强度可调整范围 $0\sim 15\ 000\text{ lx}$,温度可调整范围 $5\text{ }^\circ\text{C}\sim 50\text{ }^\circ\text{C}$.培养实验光暗时间比均设定为 $16\text{ h}:8\text{ h}$.浮萍培养容器为 250 mL 的塑料烧杯(底部面积约 0.035 m^2),每个烧杯放入培养液 200 mL,培养开始时每个处理样均放入生长状态相同的叶片,紫背浮萍湿重 0.5 g,稀脉浮萍湿重 1 g.

1.2 不同影响因素下的培养实验

1.2.1 紫背浮萍和稀脉浮萍在不同氮浓度下的培养

实验以人工培养液为基础,氮的浓度分别调整为 $1\ 3\ 5\ 7\ 10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;分为 2 个系列:氨氮和硝酸盐氮,由 $NaNO_3$ 或 NH_4Cl 配置.设定光照强度为: $8\ 000\sim 8\ 500\text{ lx}$,温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$,利用 $6\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ KOH}$ 或 HCl 将培养液调整至 2 种浮萍各自最适生长的 pH 范围,稀脉浮萍为 $5.5\sim 6.5$,紫背浮萍为 $6.5\sim$

7.5 ^[13,14].2 种浮萍在每个 N 浓度下生长 6d 适应后,开始每 3d 换一次培养液并弃去死亡后沉入水底的叶片.为使 2 种浮萍完全适应培养条件,培养持续 30d.然后将浮萍叶片捞出沥干水分,放入 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱中烘干 24h.

1.2.2 紫背浮萍和稀脉浮萍在不同磷浓度下的培养

实验仍以完全培养液为基础,磷的浓度分别调整为 $0.1\ 0.3\ 0.5\ 1\ 3\ 5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 由 NaH_2PO_4 配置,氮设定为硝酸盐氮,浓度为 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;光照强度设定 $8\ 000\sim 8\ 500\text{ lx}$,温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$.其他实验过程与 1.2.1 相同.

1.2.3 紫背浮萍和稀脉浮萍在不同光照强度下的培养

光照强度共设定 5 个范围 $500\sim 1\ 000\text{ lx}$, $2\ 000\sim 2\ 500\text{ lx}$, $4\ 500\sim 5\ 000\text{ lx}$, $8\ 000\sim 8\ 500\text{ lx}$, $10\ 000\sim 15\ 000\text{ lx}$,温度设定为 $25\text{ }^\circ\text{C}$.实验仍以人工培养液为基础,其中氮调整为 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 硝酸盐氮.其它实验过程与 1.2.1 相同.

1.2.4 紫背浮萍在不同温度下的培养

在我国的浮萍种类中,紫背浮萍是对温度的耐受范围最宽的 1 种,在南北各地均有生长^[15].本研究中,选取紫背浮萍作为温度影响的研究对象.实验温度条件共设定 7 个点: $10\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $15\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $33\text{ }^\circ\text{C}$ (气温 $35\text{ }^\circ\text{C}$)、 $35\text{ }^\circ\text{C}$ (气温 $40\text{ }^\circ\text{C}$),以培养液中的水温为准.光照强度设定为 $8\ 000\sim 8\ 500\text{ lx}$;实验仍以人工培养液为基础,其中氮调整为 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 硝酸盐氮.其它实验过程与 1.2.1 相同.

1.3 氮磷含量的分析测定方法

1.3.1 氮含量测定

(1) 样品处理 不同培养条件下的烘干叶片被取出放入研钵中研磨成粉末状,每个条件下均称取 $1\sim 3\text{ mg}$ 样品 3 份,利用元素分析仪测定氮含量.

(2) 实验所用主要仪器及试剂 美国 EAI 公司的 Ce-440 型元素分析仪及配套的分析天平.标准有机样品:乙酰苯胺.

(3) 测定程序 分别称取标准样和浮萍待测样,样品量 $1\sim 3\text{ mg}$,置于燃烧管中,放入元素分析仪样品槽.设定燃烧炉温度 $975\text{ }^\circ\text{C}$,氦气流速 $180\text{ mL}/\text{min}$,氧气流速 $15\text{ mL}/\text{min}$,由仪器利用示差热导法自动完成样品中氮含量测定.

1.3.2 磷含量测定

(1) 样品处理 不同培养条件下的烘干叶片被放入研钵中研磨成粉末状,每个条件称取 0.2 g 样品

3 份,放入 300 mL 磨口三角烧瓶中,加入 5 mL 浓硫酸(98%,分析纯),上面覆盖直径 10cm 的玻璃漏斗,利用 1 000 W 电炉在通风橱中加热消解,直至消解液成透明无色,冷却后用高纯水稀释并定容到 50 mL 的容量瓶中,然后取少量样品(1~5 mL)利用等离子发射光谱(ICP)测定其中的磷浓度。

(2)实验所用主要仪器 美国 Leeman LABS 公司的 Prodigy 型电感耦合等离子体光谱仪。

(3)采用标准曲线法由仪器自动完成待测消解液中磷浓度的测定。

1.3.3 数据处理

每个条件下的 3 个重复样品测得氮磷浓度数据取平均值,并将其换算成干重的百分比。

2 结果与讨论

2.1 培养液氮浓度对浮萍氮含量的影响

当培养液氮浓度在 1~3 mg·L⁻¹ 范围内时,2 种浮萍氮含量随氮浓度增加而增加,而当氮浓度高于 3 mg·L⁻¹,氮含量基本维持在一定水平不变。紫背浮萍在 1 mg·L⁻¹ 氮浓度中,氮含量约为干重的 5.2%,当氮浓度超过 3 mg·L⁻¹,则氮含量维持干重的在 5.7%~6% 之间。稀脉浮萍在氮 1 mg·L⁻¹ 时氮含量最低为干重的 5% 左右,当氮浓度超过 3 mg·L⁻¹ 时,氮含量在干重的 5.5% 左右;相同氮浓度下,在氨氮中生长 2 种浮萍的氮含量略高于硝酸盐氮中的,2 种浮萍相比较,紫背浮萍氮含量略高于稀脉浮萍(图 1)。

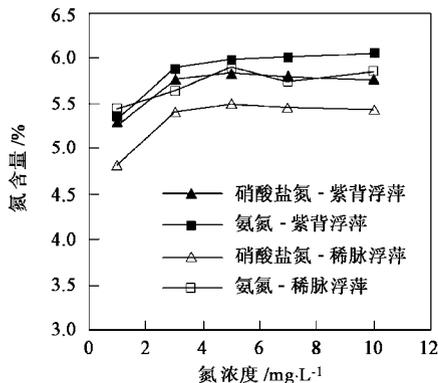


图 1 紫背浮萍和稀脉浮萍氮含量随培养液氮浓度的变化

Fig.1 Content of nitrogen in *Spirodela polyrrhiza* and *Lemna aequinoctialis* cultivated in media with different concentrations of nitrogen

水中氮浓度达到 3 mg·L⁻¹ 时,稀脉浮萍和紫背浮萍植物体氮含量即达到最大,为干重的 5.5% 左

右。有研究报道^[5],水中氮浓度为 4 mg·L⁻¹ 左右可使生长的小浮萍和另 1 种浮萍种类 *Lemna gibba* 的氮含量达到最大,范围在干重的 5%~6%,这与本研究中 2 种浮萍的结果基本一致。在许多富营养的实际污水中,氮浓度均超过 5 mg·L⁻¹,由此看来,这 2 种浮萍在这些实际污水中生长时,其氮含量将比较稳定,约在干重的 5.5% 左右。

2.2 培养液磷浓度对浮萍磷含量的影响

2.2.1 浮萍磷含量随磷浓度的变化特点

图 2 是稀脉浮萍和紫背浮萍磷含量随磷浓度的变化。从图 2 看出,在磷浓度 0.1 mg·L⁻¹~5 mg·L⁻¹ 范围内,2 种浮萍磷含量随磷浓度增加而增加直至饱和。其中稀脉浮萍在磷浓度达到 5 mg·L⁻¹ 时磷含量趋于饱和,此时约为干重的 0.6%~0.8%。紫背浮萍则是在磷浓度 5 mg·L⁻¹ 磷含量仍有进一步增加的趋势。由图也可以看出,在磷浓度低于 3 mg·L⁻¹ 时,稀脉浮萍磷含量高于紫背浮萍的含量,磷浓度高于 3 mg·L⁻¹ 时,则相反,紫背浮萍高于稀脉浮萍的。

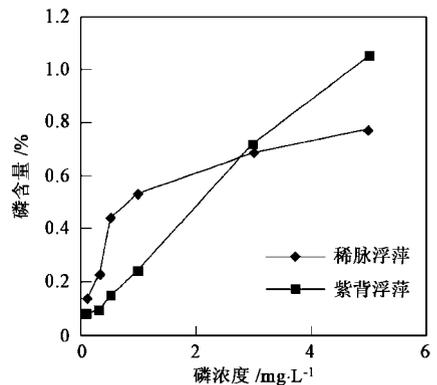


图 2 稀脉浮萍和紫背浮萍磷含量随磷浓度的变化

Fig.2 Content of phosphorus in *Lemna aequinoctialis* and *Spirodela polyrrhiza* cultivated in media with different concentration of phosphorus

通常情况下,在植物体内,90% 的磷储存于细胞的液泡中,根据生长代谢的需要,液泡中的磷再进入细胞质中。细胞质中的磷,主要是满足细胞的生长分裂及各种生理功能的发挥,其含量基本稳定。而液泡中的磷含量受环境中磷含量的影响比较大,会随外界磷浓度增高,逐渐的积累和储存^[17,18],直至达到饱和。从本研究结果来看,稀脉浮萍的饱和磷含量较低,在低的磷浓度下就可很快的达到饱和,而紫背浮萍饱和磷含量则比较高,需要高的磷浓度下才可达到饱和,这表明不同的浮萍种类积累磷的能力也有

所不同,在应用中可根据实际情况选用适用的种类.

2.2.2 浮萍磷含量与水中磷浓度的关系

浮萍体内磷的量随水中磷浓度呈现了明显得上升饱和和特点,本研究尝试以 Monod 方程经验式(1)来反映它们之间的关系.

$$a_P = \frac{a_{Pmax} C_P}{k_{WP} + C_P} \quad (1)$$

a_P :浮萍磷含量, a_{Pmax} :浮萍磷的饱和含量, C_P :水中磷浓度, k_{WP} :浮萍磷含量的半饱和常数.

利用上述模型对本研究中不同磷浓度中紫背浮萍和稀脉浮萍磷含量的数据进行回归拟合,表 2 是拟合的结果.由表可以看出,2 种浮萍模型拟合相关系数均达到了 0.97 以上, F 检验的值也非常高,表明此模型比较适用于描述浮萍植物体积积累磷的量与水中磷浓度的关系,因此在实际应用中根据水中磷浓度,可尝试利用此模型计算浮萍的磷含量.

表 2 稀脉浮萍和紫背浮萍磷含量与磷浓度关系的模型

Table 2 The relationship model between the content of phosphorus in *Lemma aequinoctialis* and *Spirodela polyrrhiza* and phosphorus level

品种	$a_{Pmax}/\%$	k_{WP}	R	F 检验	n
稀脉浮萍	0.82	0.55	0.97	223	6
紫背浮萍	2.31	6.75	0.98	513	6

2.3 光照强度对氮磷含量的影响

图 3 是紫背浮萍和稀脉浮萍氮含量随光照强度的变化.由图 3 可以看出,2 种浮萍氮含量随光照强度变化基本不变,保持 5.5%左右,由图 1 的实验结果可知,5.5%已接近 2 种浮萍的饱和氮含量,这表明氮的供应充分情况下,光照强度降低或升高不会影响浮萍组织氮含量.

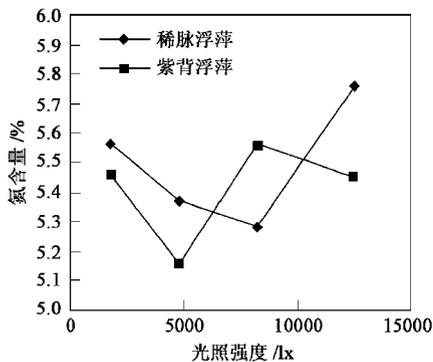


图 3 稀脉浮萍和紫背浮萍氮含量随光照强度的变化

Fig.3 Content of nitrogen in *Lemma aequinoctialis* and *Spirodela polyrrhiza* cultivated in media with various photon flux densities

图 4 是稀脉浮萍和紫背浮萍磷含量随光照强度

的变化.从图 4 看出,2 种浮萍的磷含量随光照强度增加而增加.其中在光照强度 8 000lx 时,稀脉浮萍磷含量即达到最大,紫背浮萍仍有进一步增加的趋势.相同光照强度下,紫背浮萍的磷含量高于稀脉浮萍.

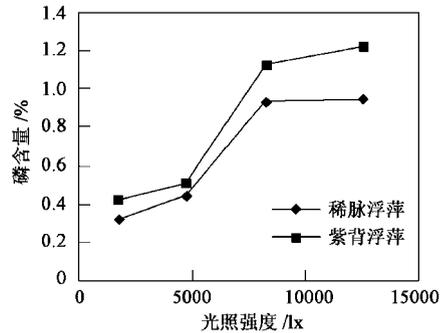


图 4 稀脉浮萍和紫背浮萍磷含量随光照强度的变化

Fig.4 Content of phosphorus in *Lemma aequinoctialis* and *Spirodela polyrrhiza* cultivated in media with different photon flux densities

在本部分的研究中,培养液中的磷浓度为 $7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,但在低的光照强度下,2 种浮萍的磷含量仍比较低,与图 2 中较低的磷浓度下含量接近.这表明尽管培养液中磷供应充足,若光照强度降低仍会导致浮萍体内积累磷的量减少.这可能与磷参与植物光合作用的能量传递和物质转移有关^[16],当光照强度降低使光合作用减弱,可能也降低了其中磷的代谢强度,相应地使植物组织所需磷减少.

2.4 温度对氮磷含量的影响

图 5 是紫背浮萍氮磷含量随温度的变化.从图可以看出,在温度低于 25°C 时,紫背浮萍氮磷含量明显降低.其中在 15°C 时氮含量只占干重的 2.5%左右,磷含量只占干重的 0.2%,高于 25°C 时氮含量

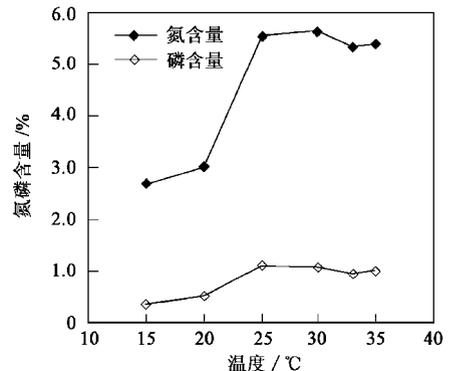


图 5 紫背浮萍氮磷含量随温度的变化

Fig.5 Content of nitrogen and phosphorus in *Spirodela polyrrhiza* cultivated in media with different temperature

基本不变,磷含量则略有下降.可见低温会同时导致浮萍氮磷含量的降低,这可能是由于细胞膜上的转运酶活性降低,从而不利于浮萍对氮磷的吸收所致^[17].

3 结论

(1)紫背浮萍和稀脉浮萍氮含量主要受培养液中氮浓度和温度的影响,低氮浓度和低温均可导致氮含量降低,氮浓度超过 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,温度高于 $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时氮含量基本保持稳定;光照强度变化对这 2 种浮萍的氮含量基本没有影响.

(2)紫背浮萍和稀脉氮含量磷含量会受培养液中磷浓度、温度和光照的影响.低温和低光照可导致磷含量降低,温度超过 $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$,光照高于 8000 lx 时 2 种浮萍磷含量则基本保持稳定;这 2 种浮萍的磷含量均随培养液中磷浓度增加而增加直至达到饱和,它们之间的关系可以用 Monod 方程来描述.其中紫背浮萍饱和磷含量高于稀脉浮萍,因此在水中磷供应充足情况下,紫背浮萍磷含量总是高于稀脉浮萍的.

参考文献:

- [1] Reddy K R, Debusk T A. State-of-the art utilization of aquatic plants in water pollution control [J]. *Wat. Sci. Tech.*, 1987, 19 (10): 61 ~ 79.
- [2] 吴振斌,詹发萃,邓家齐,等.综合生物塘处理城镇污水研究 [J]. *环境科学学报*, 1994, 14(2): 223 ~ 228.
- [3] 孙刚,盛连喜.湖泊富营养化治理的生态工程 [J]. *应用生态学报*, 2001, 12(4): 590 ~ 592.
- [4] Sherwood C R, Ronald W, Crites E, *et al.* Natural systems for waste management and treatment [M]. New York: McGraw-Hill, Inc, 1995. 134.
- [5] Landolt E. Biosystematic investigations on the family of

duckweed [M]. Zurich: Stiftung Rubel, Zurichbergstrasse, 1986.

- [6] 种云霄,胡洪营,钱易.稀脉浮萍和紫背浮萍在污水营养条件下的生长特性 [J]. *环境科学*, 2004, 25(6): 59 ~ 64.
- [7] 许万祥,周岩,胡宗则.不同加工储藏方法对浮萍营养成分的影响 [J]. *当代畜牧*, 1998, 3: 35 ~ 36.
- [8] Gijzen H J. Anaerobes, aerobes and phototrophs: A winning team for wastewater management [J]. *Wat. Sci. Tech.*, 2001, 44 (8): 123 ~ 132.
- [9] Perniel M, Ruan R, Martinez B. Nutrient removal from a stormwater detention pond using duckweed [J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 1998, 14 (6): 605 ~ 609.
- [10] Van der Steen P, Brenner A, Van Buuren J, *et al.* Post-treatment of UASB reactor effluent in an integrated duckweed and stabilization pond system [J]. *Water Research*, 1999, 33 (3): 615 ~ 620.
- [11] Bergman B A, Cheng J, Classen J, *et al.* Nutrient removal from swine lagoon effluent by duckweed [J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineering*, 2000, 42(2): 263 ~ 269.
- [12] 焦彬.中国绿肥 [M].北京:农业出版社,1986.196 ~ 200.
- [13] 中国科学院上海植物生理研究所.现代植物生理学实验指南 [M].北京:科学出版社,1999.76.
- [14] 种云霄,胡洪营,钱易. pH 及无机氮化合物对稀脉浮萍生长的影响 [J]. *生态学报*, 2003, 23(11): 2293 ~ 2298.
- [15] 种云霄,胡洪营,钱易. pH 及无机氮化合物对紫背浮萍生长的影响 [J]. *中国环境科学*, 2003, 23(4): 417 ~ 421.
- [16] 颜素珠.中国高等水生植物图说 [M].北京:科学出版社,1983.294 ~ 298.
- [17] 潘晓华,石庆华,郭进耀.无机磷对植物光合作用的影响及其机理的研究进展 [J]. *植物营养与肥料学报*, 1997, 3(3): 201 ~ 208.
- [18] 许秀美,邱化姣,周先学,等.植物对磷素的吸收、转运和代谢 [J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2001, 32(3): 397 ~ 400.
- [19] 宋克敏.植物的磷营养:磷酸盐运转系统及调节 [J]. *植物学通报*, 1999, 16(3): 251 ~ 256.